

〔特集〕 注目研究 in 年会 2015

伝熱促進を目的とした 平行平板間低レイノルズ数脈動流の DNS

東京農工大学大学院

東京理科大学

*東京農工大学大学院

東京農工大学大学院

福地良太

守裕也

岩本薫†

村田章

Direct Numerical Simulation of Pulsating Channel Flow at Low Reynolds Number for Heat Transfer Enhancement

Ryota FUKUCHI, Tokyo University of Agriculture and Technology

Hiroya MAMORI, Tokyo University of Science

Kaoru IWAMOTO †, Tokyo University of Agriculture and Technology

Akira MURATA, Tokyo University of Agriculture and Technology

1 緒言

温度が異なる二流体間に熱移動を生じさせる熱交換器は多くの工業製品に利用されている。熱交換は管内冷媒流と外部流との間で行われるが、小型の熱交換器の場合流路代表寸法が小さい為、冷媒流が伝熱性能の低い層流状態であることが多い。本研究で対象とする冷媒流路断面積の急縮小する熱交換器では、流路断面積の急縮小によりレイノルズ数が急激に減少、冷媒流は再層流化し、伝熱性能が乱流時と比べ著しく低下する。対策として、例えば流路壁に乱流促進体を設置する等⁽¹⁾が考えられるが、この系において流路の断面積が小さい事や圧力抵抗の増加を考えると乱流促進体設置は難しい。

本研究では脈動制御を用いた乱れの維持とその伝熱性能について調査を行う。ここで脈動制御とは周期的に流れを加減速する制御のことで、これまで乱流摩擦抵抗低減を目的として用いられてきた。例えば佐々布ら⁽²⁾は平行平板間乱流の直接数値計算 (DNS) を行い、脈動制御による再層流効果を確認し、摩擦抵

抗の低減とそれに伴う熱伝達率の低下を報告した。相馬ら⁽³⁾は、円管内脈動乱流の実験から最大 63% の抵抗低減率を確認し、摩擦抵抗低減のためには長い加速期間・短い減速期間の組み合わせが有効であることを示した。本研究ではこれらの調査とは逆に、乱れの維持を目的とした短い加速期間・長い減速期間を持つ脈動制御を与える。本報では、低いレイノルズ数の平行平板間流れの DNS を行い、流れ場と温度場の解析から脈動制御による熱伝達性能の調査する。

2 計算方法および評価関数

図 1 に平行平板間流れの計算領域を示す。壁面においてすべりなし条件、 x および z 方向に周期境界条件、壁面加熱条件に一樣熱流束条件を課した。計算領域は $(L_x^+, L_y^+, L_z^+) = (236, 120, 94)$ である。以下、上付きアスタリスクは無次元化に $Re = 60$ におけるチャンネル半幅 δ [m] と摩擦速度 u_τ [m/s]、摩擦温度 T_τ [m/s] で無次元化された値、上付きプラスは粘性長さ l_v [m/s] と摩擦速度 u_τ [m/s]、摩擦温度 T_τ [m/s] で無次元化された値とする。速度及び圧力はスタガード格子に定義さ

* 〒183-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

† E-mail: iwamotok@cc.tuat.ac.jp

れる．計算格子は x, z 方向に等間隔， y 方向は壁近傍で密な不等間隔とした．格子数は $(N_x, N_y, N_z) = (192, 216, 192)$ とし，格子解像度は $(\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+) = (1.22, 0.14-0.89, 0.49)$ とした．支配方程式は以下に示す連続の式，Navier-Stokes 方程式，エネルギー方程式とした．

$$\frac{\partial u_j^*}{\partial x_j^*} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + \frac{\partial u_i^* u_j^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re_\tau} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^{*2}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} + \frac{\partial \theta^* u_j^*}{\partial x_j^*} = \frac{1}{Pr Re_\tau} \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x_j^{*2}} + \frac{u_x^*}{u_b^*} \quad (3)$$

ここに θ は以下の式で定義する平均温度勾配を差し引いた温度偏差である．

$$T(x, y, z) = \frac{dT_m}{dx} x - \theta(x, y, z) \quad (4)$$

ここで， T_m は混合平均温度， u_j は流速， u_b はバルク平均流速である．摩擦レイノルズ数 Re_τ は摩擦速度 u_τ [m/s] とチャンネル半幅 δ [m]，動粘度 ν [m²/s] で定義される．式(3)の右辺第二項は一律熱流束条件によるソース項であり，またプラントル数は差動流体を空気として $Pr=0.71$ とし，壁面温度偏差は $\theta_w=0$ とした．

初期場として摩擦レイノルズ数 $Re_\tau=110$ の完全発達した場を用い，計算開始と同時に $Re_\tau=60$ とした．この計算開始直後における Re_τ の急減少は，冷媒流路断面積の急縮小に対応する．

脈動制御は，流れ方向の平均圧力勾配 $-dp^*/dx^*$ を，図 2 に示すように矩形波状に変化させることで作成し，加速期から制御を開始する．制御パラメータは脈動周期 T^* ，減速期間 T_{dec}^* ，減速期最大圧力勾配 α_{dec}^* である．本研究は乱れを維持させることを目的とするため，加速時には加速期間を短くかつ強い圧力勾配を与え，減速時には減速期間が長い脈動波形を用いる．具体的には $\alpha_{dec}^*=0.6$ ， $T^*=1.65\sim 9.00$ ， $T_{dec}^*=1.4\sim 7.5$ の間で変化させ合計 26 ケースの調査を行った．なお，一周期平均した圧力勾配は 1.00 となる．

評価関数には摩擦抵抗係数 C_f ，ヌセルト数 Nu ，摩擦係数上昇率 ΔC_f ，ヌセルト数上昇率 ΔNu を用いた．これらを以下の式(5)-(8)に示す．ここで，壁面摩擦応力 τ_w [N/m²]，バルク平均温度 θ_b [K] を表す．摩擦抵抗係数 C_f ，ヌセルト数 Nu の増加率は，脈動をさせず $Re_\tau=110$ の初期場から $Re_\tau=60$ に下げた非制御時の値 ($C_{f,uc}$ ， Nu_{uc}) を用いて計算した．

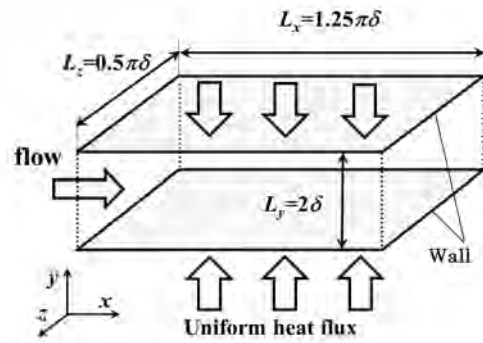


図 1 計算領域．

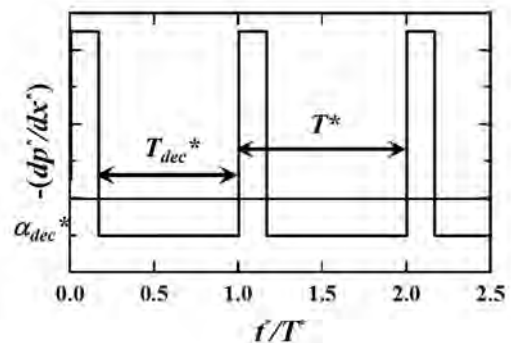


図 2 圧力勾配の時間変化．

$$C_f = \frac{2\tau_w^*}{u_b^{*2}} \quad (5) \quad \Delta C_f = \frac{C_f - C_{f,uc}}{C_{f,uc}} \times 100 [\%] \quad (6)$$

$$Nu = \frac{2}{\theta_b^*} \left. \frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} \right|_{wall} \quad (7) \quad \Delta Nu = \frac{Nu - Nu_{uc}}{Nu_{uc}} \times 100 [\%] \quad (8)$$

3 計算結果

図 3 に $T^*=6.0$ とし， T_{dec}^* を変化させた際の摩擦係数上昇率 ΔC_f およびヌセルト数上昇率 ΔNu の時間平均値をそれぞれ示す．縦軸に ΔC_f および ΔNu ，横軸に減速期間 T_{dec}^* とした．ここで ΔC_f ， ΔNu の最大値はともに $T^*=6.0$ ， $T_{dec}^*=5.0$ のケースで得られた．総じて ΔC_f および ΔNu は同様の傾向を示し，摩擦抵抗の増加と熱伝達の増加には強い相似性があることが分かる．一周期に対する減速期間の割合が長い程 ΔC_f 及び ΔNu が増加した．以後，最大ヌセルト数増加率 63% を得られたケース ($T^*=6.0$ ， $T_{dec}^*=5.0$) に注目する．

図 4 に非制御時と脈動制御時それぞれにおける C_f および Nu の時間変化を示す．横軸に計算時刻 t^* ，左軸に C_f ，右軸に Nu を示し，一点鎖線で非制御時の C_f

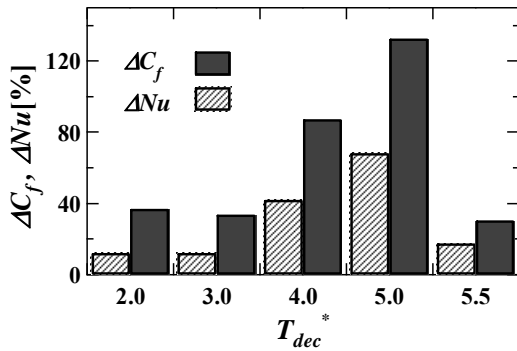


図3 時間平均値した摩擦係数上昇率およびヌセルト数上昇率 ($T^*=6.0$).

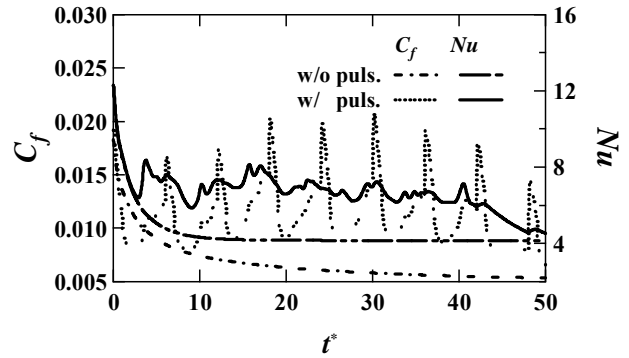


図4 脈動制御時と非制御時それぞれにおける摩擦抵抗係数とヌセルト数の時間変化 ($T^*=6.0, T_{dec}^*=5.0$).

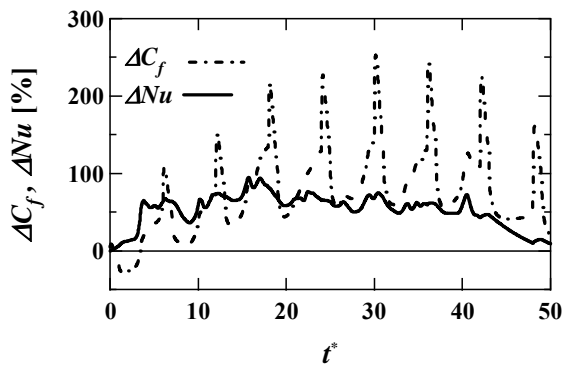


図5 脈動制御時における摩擦係数上昇率およびヌセルト数上昇率 ($T^*=6.0, T_{dec}^*=5.0$).

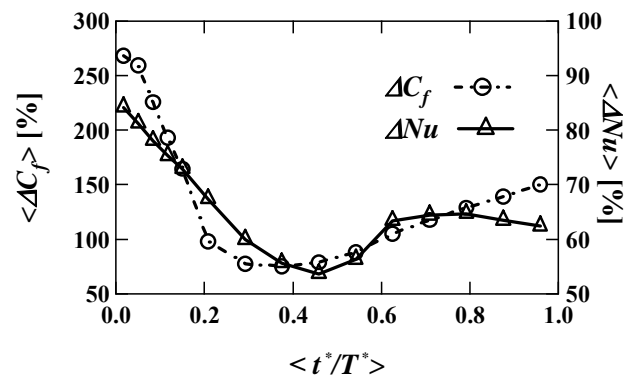


図6 位相平均を施した摩擦係数上昇率およびヌセルト数上昇率 ($T^*=6.0, T_{dec}^*=5.0$).

点線で脈動制御時の C_f 、二点鎖線で非制御時の Nu 実線で脈動制御時の Nu を示す。非制御時では $Re=110$ の初期場から C_f, Nu 共に徐々に層流の値まで減少する。他方脈動制御時には C_f, Nu 共に層流以上の値を維持していることが分かる。

図5に ΔC_f と ΔNu の時間変化を示す。横軸に計算時刻 t^* 、左軸に ΔC_f 、右軸に ΔNu を示し、一点鎖線で ΔC_f 、実線で ΔNu とした。初期場に発達した $Re=110$ の速度場及び温度場を用い、 $Re=60$ で計算を行ったため、計算開始直後($0 \leq t^* \leq 5$)で $\Delta C_f, \Delta Nu$ の値に上昇は見られない。脈動により ΔNu は最大で95%増加した。また、 $t^*=45$ 付近で層流化による Nu の減少が見られた。

図6には脈動の周期に合わせて位相平均を施した摩擦係数上昇率及びヌセルト数上昇率を示す。横軸に位相時刻 t^*/T^* 、縦軸に ΔC_f と ΔNu を表す。位相平均は、制御が効果的な期間(2~7周期目: $6 \leq t^* \leq 42$)で行い、制御初期の影響及び後期の層流化の影響を排除した。ここで、 $\langle \rangle$ は位相平均を施した値を示す。加速開始時($t^*/T^*=0$)において $\Delta C_f, \Delta Nu$ ともに最大の値をとり、 $0 \leq t^*/T^* \leq 0.45$ では単調減少した。加速初

期($t^*/T^*=0$)における最大の $\Delta C_f, \Delta Nu$ は流体の加速による壁面速度勾配の増加の為である。十分に加速されるとレイノルズ応力が抑制される為、 ΔC_f 及び ΔNu は低下する。減速期間中期の $t^*/T^*=0.6$ 付近では減速により乱れが回復し $\Delta C_f, \Delta Nu$ の上昇が確認された。

図7に加速期間および減速期間における瞬時場の流れの可視化を示す。図7(a-b)は加速時における流れ場、(c-d)は減速時の流れ場を示す。白の等値面は、図7(a)(c)において低速領域($u^+ < -3$)を、図7(b)(d)において速度勾配テンソルの第2不変量($II^+ = -0.03$)で可視化された渦構造を示す。図7(a-b)に示すように、加速期間では低速ストリークの x 方向への伸張と渦構造の抑制が確認された。一方、減速期間(図7(c-d))では低速ストリークが z 方向に揺動し、このストリーク近傍で渦が多く生成されるのが確認される。この結果乱れが生成され、 ΔNu の上昇に寄与したと考えられる。

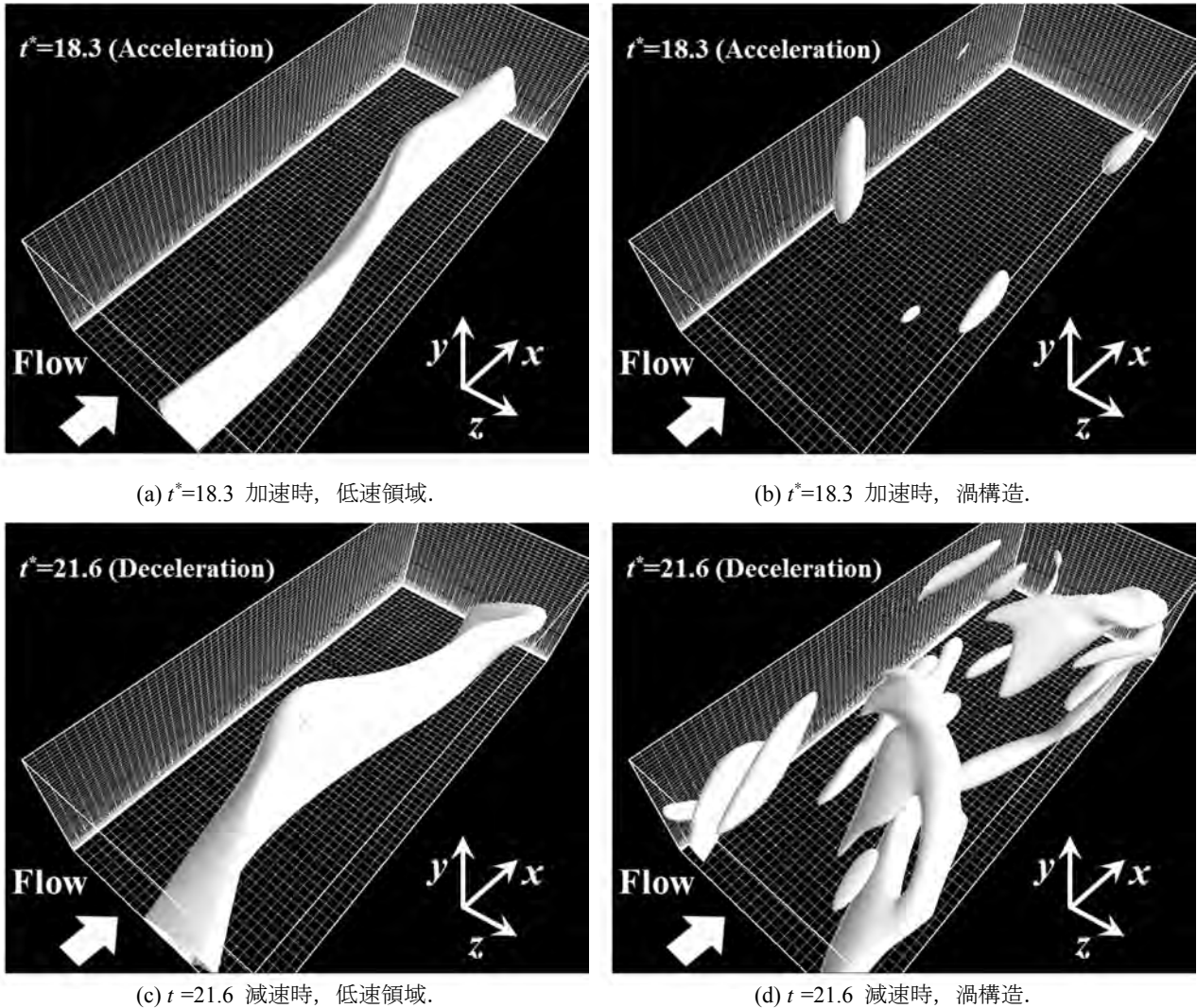


図7 流れ場の可視化結果 ($T^*=6.0$, $T_{dec}^*=5.0$) .

白の等値面: (a) (c) ,低速領域($u^+ < -3.0$); (b) (d) , 渦構造の等値面 ($II^+ < -0.03$).

4. 結論

平行平板間流における脈動制御を用いた低レイノルズ数流れの伝熱促進を目的とした直接数値計算を行った.

- 一周期に対する減速期間の割合が長い程, 摩擦係数・ヌセルト数が増加した. 減速期間において乱れが生成され, 伝熱促進に寄与する. 最大のヌセルト数上昇率 63%を $T^*=6.0$, $T_{dec}^*=5.0$ において確認した.
- 脈動一周期の中で下記の現象が確認された.
 1. 加速初期において, 壁面応力の増加に伴い摩擦係数・ヌセルト数が増加した.
 2. 十分な加速後, 渦構造及びレイノルズ応力が減少し, 結果として摩擦係数及びヌセルト数が低下する.
 3. 減速により速度ストリーク構造がスパン方向に揺動し, 渦構造が増加する. そのため,

摩擦係数・ヌセルト数が増加する.

引用文献

- (1) 長野ら, : リブつきチャンネル乱流の速度場と温度場の直接数値シミュレーション, 機論 B, 70 (2004) pp. 229-236.
- (2) 佐々布ら, : 脈動制御によるチャンネル乱流の層流化における抵抗低減効果, 第21回日本数値流体力学会シンポジウム講演論文集 (2007) pp. 213-218.
- (3) 相馬ら, : 円管内脈動乱流の摩擦抵抗低減効果に与える圧力勾配波形の実験的解析, 機論 B, 78 (2012) pp. 521-530.